

DaimlerChrysler AG

1
4/PRTS

10/525359

ET01 Rec'd PCT/PTC 23 FEB 2005

Mikrostrukturiertes Katalysatorkörper und Verfahren zu dessen
Herstellung

- 5 Die Erfindung betrifft mikrostrukturierte Katalysatorkörper für chemische Reformer zur Anwendung bspw. in Brennstoffzellensystemen sowie ein Verfahren zu deren Herstellung.

10 Als Resultat von immer drastischeren Auswirkungen der Energiegewinnung aus fossilen Brennstoffen und unter dem Aspekt des ressourcenschonenden Umganges mit Energieträgern haben Brennstoffzellen als effiziente und umweltfreundliche Alternative ein sehr hohes Marktpotential. Auch im Automobilsektor wird seit langer Zeit die Brennstoffzellentechnologie erfolgreich

15 reich getestet. Dabei besteht eine Variante darin, den für die Brennstoffzellen benötigten Wasserstoff erst im Automobil aus flüssigen Kraftstoffen wie Methanol oder herkömmlichen Benzin zu gewinnen. Dazu ist im Automobil jedoch ein sog. Reformierungsprozess notwendig, der langkettige Kohlenwasserstoffe in Wasserstoff und Kohlendioxid umwandelt. In diesem

20 Fall wird dazu ein Verfahren verwendet, bei dem die Ausgangskomponenten (Wasser und/oder Luft und flüssige Kohlenwasserstoffe) bei hohen Temperaturen durch die Einwirkung eines Katalysators die Endprodukte wie bspw. Wasserstoffe freisetzen.

25

Dieser Prozess kann in zwei Stufen unterteilt werden: In der Reformierungsreaktion, die je nach Reformierungsverfahren stark endotherm, stark exotherm oder autotherm verlaufen kann, wird der Kohlenwasserstoff zusammen mit Wasser und/oder

30 Luft u.a. in Kohlenmonoxid und molekularen Wasserstoff umge-

setzt. Da die flüssigen Ausgangsprodukte unter hohen Druck
gesetzt werden können und der im Abgas befindliche Rest-
Wasserstoff (der in der Brennstoffzelle nicht umgesetzt wer-
den konnte) z.B. zur Heizung der ersten Reaktorstufe genutzt
5 werden kann, besitzt dieser Prozess ein sehr hohes Potenzial
zur Miniaturisierung aller beteiligten Komponenten. Dazu ist
aber zwingend ein hoher Wirkungsgrad der ersten Stufe erforder-
lich, in der der benötigte Wasserstoff katalytisch erzeugt
wird.

10 Für den beschriebenen Reformierungsprozess werden üblicher-
weise sogenannte katalytische Reformer eingesetzt. Hierbei
handelt es sich in der Regel entweder um poröse Metallstruk-
turen bzw. -schäume oder um mikrostrukturierte Schichtstruk-
turen mit einer großen, üblicherweise mit einer katalytisch
15 aktiven Schicht versehenen Oberfläche. Entscheidende Krite-
rien für den Umsetzungsgrad der Reaktanden ist hierbei zum
einen das Oberflächen/Volumenverhältnis des Reaktors, die
Druckdifferenz über die Mikrostruktur sowie der Wärmeaus-
tausch an der Grenzfläche zu den Reaktanden. Daneben spielt
20 aber auch Temperaturstabilität und Beständigkeit des verwen-
deten Materials gegenüber Temperaturzyklen eine bedeutende
Rolle.

In der US 5 811 062 wird ein derartiger katalytischer Refor-
25 mer vorgestellt. Der im dort beschriebenen Reformer verwen-
dete Katalysatorkörper besteht im wesentlichen aus einem Stapel
von miteinander verbundenen Schichtelementen aus Metall, Ke-
ramik oder einem Halbleitermaterial, in die durch Mikrostruk-
turierungsverfahren wie z. B. Ätzverfahren Hohlräume wie
30 bspw. Kanäle oder Poren eingebracht sind. Hierbei ist die Ge-
ometrie der Mikrostrukturen so gewählt, dass zum einen der
Durchtritt der Reaktanden von Schichtelement zu Schichtele-
ment durch makroskopische Öffnungen und zum anderen die Strö-
mung der Reaktanden entlang der Schichtelemente durch in die
35 Oberflächen der Elemente eingebrachte Hohlräume erfolgt.
Diese Anordnung weist jedoch eine Reihe von Nachteilen auf.

So wechseln die Reaktanden beim Passieren des Reformers mehrfach die Strömungsrichtung, wodurch sich der Strömungswiderstand des Reformers erhöht.

5 Ferner ist das Miniaturisierungspotential der in der genannten Schrift beschriebenen Anordnung begrenzt, da pro Schichtelement jeweils nur eine Ebene von entlang der Oberfläche verlaufenden Hohlräumen realisiert werden kann und aus Stabilitätsgründen die Dicke der einzelnen Schichtelemente einen bestimmten Wert nicht unterschreiten darf.

10 Darüber hinaus ist das Herstellungsverfahren des beschriebenen Reformers aufwendig und damit teuer, da sehr viele entlang der Oberfläche verlaufende Hohlräume zu realisieren sind und die einzelnen Schichtelemente unterschiedliche Geometrien aufweisen.

15

Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, einen Katalysatorkörper für katalytische Reformer zu realisieren, der einfach und kostengünstig herstellbar ist und bei minimalen Außenabmessungen eine maximale reaktionswirksame Oberfläche sowie
20 einen möglichst geringen Strömungswiderstand aufweist sowie ein Verfahren zu seiner Herstellung anzugeben.

Diese Aufgabe wird durch die Merkmale der in den unabhängigen Ansprüchen 1, 8, 16 und 18 beschriebenen Vorrichtungen und
25 Verfahren gelöst. Die in den Unteransprüchen beschriebenen Merkmale bilden vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung.

Der erfindungsgemäße Katalysatorkörper besteht aus einer gestapelten Schichtstruktur aus einzelnen Schichtelementen wie
30 in Fig. 1 (Querschnitt durch ein Schichtelement) dargestellt. Hier verlaufen die Hohlräume 2, beispielsweise Poren oder Kanäle im wesentlichen senkrecht zur Schichtoberfläche durch die einzelnen Schichtelemente 1 hindurch. Diese Anordnung weist eine Reihe von Vorteilen auf:

35 Die Reaktanden durchströmen den Reaktor im wesentlichen geradlinig. Dadurch wird der Strömungswiderstand der Anordnung

verringert und damit der maximal mögliche Durchsatz deutlich erhöht.

Ferner läßt sich der erfindungsgemäße Katalysatorkörper ausgezeichnet miniaturisieren, da sich durch die senkrechte Anordnung der Hohlräume der Minimalabstand der einzelnen Hohlräume voneinander drastisch verringern läßt. Abstände im Bereich von 50nm sind problemlos erreichbar; ein Wert, der für die oben angegebene konventionelle Struktur vollständig unrealistisch erscheint, da einzelne Schichtelemente dieser geringen Dicke mit bekannten Herstellungsverfahren weder herstell- noch strukturierbar sind.

Ein weiterer Vorteil der Erfindung besteht darin, daß im Unterschied zu der in der US 5 811 062 beschriebenen Vorrichtung identische Schichtelemente verwendet werden können, was die Herstellung der erfindungsgemäßen Katalysatorkörper deutlich vereinfacht und somit verbilligt; zur Strukturierung aller Elemente kann der gleiche Prozess verwendet werden.

Besonders vorteilhaft ist es, die Schichtelemente aus Silizium oder einem Silizium-Mischkristall auszuführen.

Durch die Verwendung von Silizium als Trägerstruktur für den Katalysator besteht die Möglichkeit, die Geometrie, Porosität und Porendurchmesser des Reformers in einem sehr großen Bereich optimieren zu können. Der Porendurchmesser in Silizium kann zwischen ca. $0.8\mu\text{m}$ und mehreren $100\mu\text{m}$ variiert werden und so den Anforderungen zum optimalen Durchfluß, der Reaktionskinetik und der Gasumsetzung angepaßt werden.

Silizium ist zudem äußerst temperaturstabil und selbst gegenüber häufigen Temperaturzyklen nicht anfällig.

Die Ätzung von Silizium ist durch die ausgereifte Si-Prozesstechnologie darüber hinaus sehr kostengünstig.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung der Erfindung besteht darin, dass die Abmessungen der Hohlräume sowohl entlang der Strömungsrichtung als auch senkrecht dazu variabel gestaltet werden. Beispielsweise ist es denkbar, dass sich die durch den Katalysatorkörper verlaufenden Kanäle entlang der Strö-

mungsrichtung verjüngen. Auf diese Weise wird es möglich, ein unter reaktionskinetischen Gesichtspunkten besonders vorteilhaftes Druck- und Geschwindigkeitsprofil im Reaktor einzustellen.

5

Zur Verbesserung der Haftung eines Katalysatormaterials auf dem Katalysatorträger ist es ferner vorteilhaft, eine Metallisierungsschicht auf dem Trägermaterial vorzusehen. Besonders bewährt hat sich hier Aluminium, für dessen Prozessierung umfangreiche Erfahrungen aus der Halbleitertechnologie vorliegen.

Selbstverständlich ist es für eine effiziente katalytische Wirkung des Reformers besonders vorteilhaft, auf die innere Oberfläche ein katalytisch aktives Material aufzubringen. Besonders geeignet ist hierfür Platin, allerdings sind auch andere Katalysatormaterialien denkbar.

Zur Verringerung des Strömungswiderstands des Katalysatorkörpers ist es vorteilhaft, die Anzahl der verschlossenen Kanäle, (sog. „dead ends“) in der Struktur zu minimieren. Hierzu ist es erforderlich, die Enden der einzelnen Kanäle am Übergang zwischen zwei Schichtelementen passgenau aneinander auszurichten. Hierbei ist es besonders vorteilhaft, beim Strukturierungsprozess der Schichtelemente Justiermarken vorzusehen. So können beispielsweise die einzelnen Schichtelemente an ihren Außenkanten mit schräg abfallenden MESAFLANKEN versehen werden, die passgenau in eine entsprechende Ausnehmung auf der Rückseite des benachbarten Schichtelementes angeordnet werden können. Diese mechanischen Justierelemente können durch einen weiteren Extraschritt beim Ätzen der Hohlräume in das Substrat ohne großen Aufwand hergestellt werden. Somit lassen sich die einzelnen Schichtelemente exakt aneinander ausgerichtet in beliebiger Anzahl stapeln; die dabei erreichte Präzision wird anschaulich klar, wenn man sich vor Augen führt, dass ein auf diese Weise hergestellter Katalysatorträger-

ger mit einer Dicke im Zentimeterbereich in Richtung der Hohlräume durchsichtig erscheint.

Zur Einstellung der optimalen Reaktionstemperatur ist es vorteilhaft, eine integrierte Widerstandsheizung vorzusehen. Hierzu kann durch geeignete Dotierung des Siliziums die gewünschte Leitfähigkeit oder das gewünschte Leitfähigkeitsprofil eingestellt werden. Legt man nun an den Halbleiter-Katalysatorkörper eine Spannung an, so wird dieser durch den fließenden Strom aufgeheizt; mittels einer Stromregelung wird die gewünschte Reaktionstemperatur einstellbar. Hierzu ist es besonders vorteilhaft, Halbleiter mit guter Wärmeleitfähigkeit wie z. B. Silizium als Katalysatorträger zu verwenden.

Es hat sich bewährt, den Katalysatorkörper nach dem folgenden Verfahren herzustellen:

Ein geeignetes Ausgangsmaterial bilden z.B. $\sim 300\mu\text{m}$ dicke, p-dotierte Siliziumsubstrate mit 10cm Durchmesser. Zunächst werden in die Substrate z. B. mittels des anodischen Ätzverfahrens oder eines Trockenätzverfahrens die im wesentlichen zur Schichtoberfläche senkrechten Poren eingeätzt.

Anschließend kann das nunmehr poröse Substrat in Stücke mit den gewünschten Abmessungen gesägt werden, die je nach Dicke der porösen Schichtelemente mehrmals aufeinandergestapelt und beispielsweise in einem Gehäuse aus rostfreiem Stahl fixiert werden.

Besonders vorteilhaft ist es hierbei, als nasschemisches Ätzverfahren das sogenannte anodische Ätzen zu verwenden. Eine beispielhafte Anordnung hierzu ist in Fig. 2 dargestellt. Als Elektrolyt 2 wird eine wässrige Lösung aus HF:Dimethylformamid (DMF) oder HF:Isopropanol in einem Behälter 5 verwendet. Die Ätzung erfolgt in der Regel galvanostatisch, also mit konstantem Strom zwischen der Anode 4 und der Kathode 1. Hier spielt die an der Elektrolytgrenzfläche im Halbleiterwafer 3 entstehende Verarmungszone (oder Raumladungszone) eine entscheidende Rolle bei der Bildung der Hohlräume: Der Diffu-

sionsstrom von Ladungsträgern überwiegt je nach Form der geätzten Hohlräume gegenüber Strömen durch Tunneln oder thermische Anregung. Ein anisotropes Ätzen der Hohlräume findet statt, wenn der Abstand einzelner Hohlräume geringer ist als die doppelte Dicke der Verarmungszone, da dann der Ladungsträgertransfer zu den Hohlraumwänden blockiert wird. Da die Raumladungszone durch die angelegte Spannung sowie die Dotierung des Substrates bestimmt wird, kann durch gezielte Änderung dieser Parameter die Form und Dichte der Hohlräume beeinflusst werden. Sowohl Durchmesser als auch die Dichte der geätzten Hohlräume können bei diesem sogenannten "selbstorganisierten Ätzen" durch die Wahl der Substratdotierung angepaßt werden. Ein wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens ist damit erreichbare hohe Oberflächen-/Volumenverhältnis.

Da es bisher aus technologischen Gründen nicht möglich ist, durch anodisches Ätzen einen Wafer bis zur Rückseite komplett durch zu ätzen, muß die poröse Schicht durch einen Abhebeprozess abgelöst werden. Dazu wird bei der gewünschten Hohlraumtiefe die Stromdichte zum Ätzen innerhalb weniger Sekunden deutlich erhöht, wodurch es an den Spitzen der Hohlräume zu einem drastischen Anstieg des Ladungsträgertransfers kommt und das Silizium dort isotrop geätzt wird. Als Folge wird die Schicht mit den geätzten Hohlräumen vom Substrat abgehoben.

Eine weitere vorteilhafte Variante des Ätzverfahrens ist die Ätzung von Hohlräumen mittels Plasmaätzung. Das Verfahren, bei dem die Prozessgase C_4H_8 und SF_6 eingesetzt werden, erlaubt dabei eine anisotrope Ätzung mit Aspektverhältnissen (Verhältnis Hohlraumdurchmesser/Hohlraumlänge) von rund 1:20. Für eine Waferdicke von $300\mu m$ kann der Durchmesser der plasmageätzten Hohlräume demnach etwa $15\mu m$ oder darüber liegen. Mit diesem Verfahren kann ein Substrat auch vollständig durchgeätzt werden. Die Ätzrate in diesem Plasmaprozess beträgt ca. $80\mu m/h$.

35

Das oben beschriebene Verfahren zum anodischen Ätzen von Silizium kann dahingehend modifiziert werden, daß durch einen

photolithographischen Prozess die Position der Hohlräume an der Oberfläche kontrolliert werden kann. In Verbindung mit einer Justierung der Schichtelemente gegeneinander können so sog. "dead ends" (einseitig geschlossene Hohlräume) im Katalysatorkörper weitgehend vermieden werden. Dazu wird zunächst auf der Oberfläche des Substrates eine ca. $2\mu\text{m}$ dicke Siliziumdioxid-Schicht mit einer Fotomaske strukturiert, so daß die späteren Stellen der Hohlräume durch eine Oxidätzung mit BHF frei geätzt werden können. Durch diese Oxidmaske auf der Si-Oberfläche werden durch die anschließende Ätzung mit einer KOH-Lösung invertierte Pyramiden in das Silizium geätzt. KOH ätzt selektiv auf bestimmte Kristallrichtungen von Si; (111) Oberflächen des Kristalls werden durch die Ätze praktisch nicht angegriffen, wodurch auf der (100) Si-Oberfläche Vertiefungen mit invertierter Pyramidenstruktur entstehen (Winkel gegenüber $\langle 100 \rangle$ Oberfläche 54°). Für eine anschließende anodische Ätzung kann die Seitenlänge der invertierten Pyramiden durch die verwendete Oxidmaske zwischen ca. $2\mu\text{m}$ und $\sim 20\mu\text{m}$ eingestellt werden. Da die Spitzen dieser Pyramiden für den Strom bei der anodischen Ätzung eine bevorzugte Inhomogenität darstellen, wird der Ätzprozess genau hier beginnen und entsprechend seinem anisotropen Charakter auch in das Substrat fortgesetzt.

Durch dieses Verfahren zur definierten Ätzung ist es bei einer Stapelung von mehreren Lagen dieser Schichten möglich, bspw. durch Verwendung von Justiermarken einen einzelnen Hohlraum über die gesamte Reaktorlänge (einige cm) fortzusetzen. Gegenüber den ungeordneten Hohlräumen, oder aber auch sonstigen mikroporösen Materialien (z.B. Metallschäume, Granulate o.ä.) minimiert sich der Druckverlust über den Reformier deutlich, da keine "dead ends" in der Struktur entstehen.

Besonders reizvoll ist es, das selbstorganisierte Ätzen (ohne photolithographische Vorstrukturierung) mit dem Verfahren der photolithographischen Vorstrukturierung zu kombinieren. Beispielsweise ist es denkbar, einen Wafer zunächst auf der einen Seite mit Vorstrukturierung anzuätzen, anschließend umzu-

5 drehen und von der anderen Seite selbstorganisiert bis zum Durchbruch durch die vorstrukturierten Ätzgruben der gegenüberliegenden Seite durchzuätzen. Damit lassen sich die Vorteile des selbstorganisierten Ätzens (große erreichbare Oberfläche) mit denen des vorstrukturierten Ätzens (zumindest einseitige Ausrichtbarkeit der Hohlräume gegeneinander zur Vermeidung von dead ends) in vorteilhafter Weise kombinieren.

10 Ferner gestatten es die vorgeschlagenen Ätzverfahren, Wafer beliebigen Durchmessers zu strukturieren; eine wesentliche Voraussetzung für eine großtechnische und damit kostengünstige Realisierung des Herstellungsverfahrens.

15 Um die Haftung eines Katalysatormaterials am Katalysatorträger zu verbessern, ist es vorteilhaft, die geätzten Hohlräume vor dem Vereinzeln des Wafers zunächst noch mit einer metallischen Oberfläche zu versehen. Am besten eignet sich hierzu Aluminium, das auch sehr häufig in der etablierten Si-Technologie Einsatz findet. Zwei Arten der Oberflächenbedeckung sind möglich: Aluminium kann unter Vakuumbedingungen 20 durch Verdampfen aus der Alu-Schmelze auf den Wafer und die Wände der geätzten Hohlräume aufgebracht werden.

Daneben kann eine metallische Oberfläche auch durch sog. Sputtern von Aluminium erzeugt werden. Dies ist ein Plasma- 25 maprozess, bei dem die ionisierten Teilchen aus dem Plasma auf ein metallisches Target (hier Alu) treffen, von dort Atome herausschlagen, die ihrerseits auf die darunter befindliche Probe deponiert werden.

Beide Methoden sind prinzipiell für die Beschichtung des Katalysatorträgers geeignet. Für die Funktion des Reformers ist 30 die Dicke der abgeschiedenen Aluminiumschicht nicht maßgeblich. Es genügt daher eine Deposition von wenigen nm Aluminium. Selbstverständlich sind zur Realisation der metallischen Haftschrift auch Materialien wie beispielsweise Kupfer oder 35 Nickel bzw. deren Legierungen geeignet.

Für eine gute katalytische Wirkung des Reformers ist beispielsweise eine Platinbeschichtung besonders vorteilhaft. Grundsätzlich ist für eine gute Haftung der katalytisch aktiven Beschichtung auf der metallischen Haftschrift eine Anpassung der thermomechanischen Eigenschaften der verwendeten Materialien erforderlich; insbesondere sollten Materialien mit ähnlichen Längenausdehnungskoeffizienten verwendet werden, um das Auftreten von Spannungen der Schichten gegeneinander und damit die Gefahr der Ablösung von Schichten bei Temperaturschwankungen zu minimieren.

Das Aufbringen der katalytisch aktiven Schicht erfolgt in vorteilhafter Weise durch thermisches Spritzen oder Plasmaspritzen.

Das Prinzip thermischer Spritzverfahren besteht darin, daß der Beschichtungswerkstoff, der pulver- oder stabförmig vorliegen kann, in einer thermischen Energiequelle aufgeschmolzen und in schmelzflüssigem Zustand auf das Substrat beschleunigt wird.

Beim Plasmaspritzen wird die zum Aufschmelzen des Spritzwerkstoffes notwendige Energie durch ein Plasma erzeugt. An einer zentrisch angeordneten, wassergekühlten Kupferanode brennt beim Plasmaspritzen ein gasstabilisierter Lichtbogen hoher Energiedichte. Das zugefügte Plasmagas ionisiert zum Plasma und verlässt die Brenndüse mit hohen Geschwindigkeiten (etwa 300-700 m/s) bei Temperaturen von 15.000 bis 20.000 K. Der pulverförmige Beschichtungswerkstoff wird mittels eines Trägergases über Zuführkanäle in den Plasmastrahl eingebracht, dort aufgeschmolzen und mit hoher Geschwindigkeit auf das Substrat geschleudert.

Die beschriebenen Herstellungsverfahren erlauben es, den Reaktor mit dem erfindungsgemäßen Katalysatorkörper in vorteilhafter Weise durch eine geeignete Wahl der Gehäusekonstruktion segmentweise aufzubauen. Somit kann unterschiedlichen An-

forderungen an den katalytischen Reaktor durch eine Kombination von Segmenten unterschiedlicher Anzahl und Bauart je nach Anwendungsgebiet Rechnung getragen werden.

- 5 Zudem erlaubt die hervorragende Miniaturisierbarkeit des erfindungsgemäßen Katalysatorkörpers seine vorteilhafte Verwendung in Anwendungen mit besonderen Anforderungen an den maximal benötigten Bauraum. Der Einsatz in Brennstoffzellensystemen für mobile Anwendungen, insbesondere in Kraftfahrzeugen,
10 ist hierbei von besonderem Interesse.

DaimlerChrysler AG

Patentansprüche

- 5 1. Katalysatorkörper mit einem oder mehreren Schichtelementen mit geätzten, von strömungsfähigen Medien durchström-
baren Hohlräumen wie bspw. Poren oder Kanälen,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass die Hohlräume im wesentlichen senkrecht zur Oberflä-
10 che der Schichtelemente angeordnet sind.
2. Katalysatorkörper nach Anspruch 1,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass die Schichtelemente im wesentlichen aus Silizium o-
15 der einem Silizium-Mischkristall bestehen.
3. Katalysatorkörper nach einem der vorangehenden Ansprüche,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass die zur Strömungsrichtung des Mediums senkrechten
20 Abmessungen der Hohlräume variieren.
4. Katalysatorkörper nach einem der vorangehenden Ansprüche,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass die Oberflächen der Hohlräume eine metallische Be-
25 schichtung aufweisen.
5. Katalysatorkörper nach einem der vorangehenden Ansprüche,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass die Oberflächen der Hohlräume eine katalytisch akti-
30 ve Beschichtung aufweisen.

6. Katalysatorkörper nach einem der vorangehenden Ansprüche,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass die mindestens zwei der Schichtelemente Justiermar-
ken aufweisen.

5

7. Katalysatorkörper nach einem der vorangehenden Ansprüche,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass die Schichtelemente im wesentlichen aus elektrisch
leitfähigem Material bestehen.

10

8. Verfahren zur Herstellung eines aus einzelnen Schichtele-
menten aufgebauten Katalysatorkörpers mit folgenden Ver-
fahrensschritten:

15

- Ätzen von durchgehenden Hohlräumen, die im wesentlichen
senkrecht zur Schichtoberfläche verlaufen, in die
Schichtelemente,
- Aufeinanderstapeln der geätzten Schichtelemente

20

9. Verfahren nach Anspruch 8, wobei das Ätzen durch ein ano-
disches oder photoanodisches Ätzverfahren erfolgt.

10. Verfahren nach Anspruch 8, wobei das Ätzen durch ein
plasmagestütztes Ätzverfahren erfolgt.

25

11. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche 8-10,
wobei zusätzlich Justiermarken auf den Schichtelementen
aufgebracht werden.

30

12. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche 8-11,
wobei mindestens eine Schichtoberfläche durch einen pho-
tolithographischen Prozess vorstrukturiert wird.

35

13. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche 8-12,
wobei die Oberflächen der Hohlräume mit einer metalli-
schen Schicht versehen werden.

14. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche 8-13,
wobei die Oberflächen der Hohlräume mit einer katalytisch
wirksamen Schicht versehen werden.

5 15. Katalytischer Reaktor mit einem Gehäuse mit Zu- und Ab-
leitungen für Reaktanden und einem Katalysatorkörper,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass er einen Katalysatorkörper nach den Ansprüchen 1-7
aufweist.

10

16. Katalytischer Reaktor nach Anspruch 15,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass er abschnittsweise mehrere Katalysatorkörper auf-
weist.

15

17. Brennstoffzellensystem mit einem katalytischen Reaktor
als Reformier- und einer Brennstoffzelle,
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
dass es einen katalytischen Reaktor nach Anspruch 15 oder
20 16 aufweist.